第 39 卷 第 6 期
2022 年 12 月

应 用 力 学 学 报
Chinese Journal of Applied Mechanics

Vol. 39 No. 6
Dec. 2022

文章编号:1000-4939(2022)06-1168-10

串联回转体高速入水空化及运动特性的数值模拟

周东辉[1],施红辉[2]

(1. 浙江工业职业技术学院,312000 绍兴;2. 浙江理工大学机械与自动控制学院,310018 杭州)

摘 要:为了研究串联回转体高速入水问题,基于求解雷诺时均的 Navier-Stokes 方程,采用 VOF 多相流模型和 6 自由度(6DOF)刚体运动模型,引入 Schnerr-Sauer 空化模型,结合重叠网格技术建立了串联回转体高速入水的三维数值计算模型,发现了串联回转体入水空泡演化的一些新现象,获得了不同入水时序下串联回转体入水空泡的演化规律,结合入水空泡的演化规律,分析了入水空泡演化过程对串联回转体运动特性的影响,给出了串联回转体高速入水的运动模式。结果表明:次发回转体入水过程受到首发回转体入水空泡流场的影响,在入水撞击阶段,次发回转体受到的冲击力小于首发回转体的,而且在入水过程中次发回转体的速度衰减小于首发回转体的;随着入水时序增大,串联回转体入水运动模式依次出现追尾模式和弱扰动模式,在追尾模式中,次发回转体能够进入首发回转体形成的入水空泡内部运动并最终追上首发回转体,在弱扰动模式中,首发回转体的入水空泡演化过程不受次发回转体入水的影响,而次发回转体的入水空泡演化和运动受到了首发回转体空泡尾迹的干扰。

关键词:串联回转体;高速入水;空泡;数值模拟

中图分类号:TJ630 **文献标志码**:A **DOI**:10.11776/j.issn.1000-4939.2022.06.018

Numerical simulation of cavitation and motion characteristics of high-speed water entry of tandem revolved bodies

ZHOU Donghui[1], SHI Honghui[2]

(1. Zhejiang Industry Polytechnic College, 312000 Shaoxing, China;
2. College of Mechanical Engineering and Automation, Zhejiang Sci-Tech University, 310018 Hangzhou, China)

Abstract: In order to study the high-speed water entry of tandem revolved bodies, a three-dimensional numerical simulation model of high-speed water entry of tandem revolved bodies is established based on solving Reynolds time averaged Navier Stokes equation, using VOF multiphase flow model and 6 degrees of freedom (6DOF) rigid body motion model, Schnerr-Sauer cavitation model and overlapping grid technology. Some new phenomena in the cavities evolution of tandem revolved bodies were found, and the evolution law of cavities under different water entering time sequences were obtained. Combined with the evolution law of cavities, the influence mechanism of the evolution process of cavities on the motion of tandem revolved bodies was analyzed, and the motion mode of tandem revolved bodies entering water at high speed

收稿日期:2021-10-15 修回日期:2022-02-27
基金项目:浙江省自然科学基金资助项目(No. LY16A020003)
通信作者:施红辉,教授。E-mail: hhshi@zstu.edu.cn
引用格式:周东辉,施红辉. 串联回转体高速入水空化及运动特性的数值模拟[J]. 应用力学学报,2022,39(6):1168-1177.
ZHOU Donghui, SHI Honghui. Numerical simulation of cavitation and motion characteristics of high-speed water entry of tandem revolved bodies[J]. Chinese journal of applied mechanics, 2022, 39(6):1168-1177.

was given. The results show that the water entry process of the secondary revolved body is affected by the cavitation flow field of the first revolved body. In the water entry impact stage, the impact force of the secondary revolved body is less than that of the first revolved body. Moreover, the velocity attenuation of the secondary revolved body is less than that of the first revolved body. With the increase of water entering time sequence, the water entry motion mode of tandem revolved bodies appears rear-end collision mode and weak disturbance mode in turn. In the rear-end collision mode, the secondary revolved body can enter the water entry cavity formed by the first revolved body and finally catch up with the first revolved body. In the weak disturbance model, the cavities evolution process of the first revolved body is not affected by the water entry of the second revolved body, while the cavities evolution and motion of the second revolved body are disturbed by the cavitation wake of the first revolved body.

Key words: tandem revolved bodies; high speed water entry; cavity; numerical simulation

在实际军事应用中,为了提高武器的打击火力、命中效率和毁伤效果,往往需要在短时间内连续发射超空泡射弹/反潜火箭进行攻击。例如,水下蛙人或水下机器人的移动速度通常为 0.5 ~ 5 m/s,10 ms 内这些目标的位移也只有几厘米[1],那么朝同一个方向连续发射射弹可以提高目标被消灭的概率。上述工程应用涉及了串联运动体的高速入水问题,该入水过程不仅包含穿越自由面、湍动、相变等复杂流动状态,还存在各运动体流场之间的相互干扰,水动力特性十分复杂,这与单独的运动体高速入水有很大的区别。因此,研究串联运动体高速入水问题具有重要的科学意义和工程应用价值。

目前国内外学者对入水问题的研究主要集中在单独物体入水[2]。1897 年,Worthington 等[3]采用闪光摄影技术首次获得了球体低速入水产生的物理现象。第二次世界大战后,May 等[4-5]在入水问题上进行了更深入的研究,针对球体、射弹开展了大量试验,研究了球体表面状态对入水空泡产生的影响以及射弹运动参数对入水空泡发展的影响。Abelson[6]对射弹以不同角度入水(入水角度分别为 45°、60°、90°)进行了实验研究,测量了入水空泡的压力。Lee 等[7]根据能量守恒原理建立了模拟射弹高速入水过程中空泡发展和溃灭的理论模型,可以预测入水空泡深闭合的时间和位置。Shi 等[8]采用高速摄像技术记录了射弹高速垂直入水的图像,获得了射弹入水后速度的变化,并提出了一个理论模型来预测射弹入水后的运动。Truscott 等[9]进行了射弹小角度倾斜入水实验,为了使射弹能够成功入水并在水下稳定运动,他们重新设计了射弹头部的几何结构,讨论了弹头的几何形状对射弹的动力学、临界入射角、入水空泡发展的影响。Iranmanesh 等[10]利用 VOF 方法对水平圆柱入水的流动特性进行了三维数值模拟,研究了圆柱体的直径、长度、入水速度等参数对入水深度的影响。Nguyen 等[11]耦合 Navier-Stokes(N-S)方程和 6 自由度(6DOF)刚体运动模型,基于重叠网格技术建立了求解物体入水的三维数值模拟方法,并验证了该方法的可行性。Treichler 等[12]采用高速摄像技术实验研究了超空泡射弹垂直入水引起的空化流动特性,并采用压电传感器记录了撞击点位置和射弹运动方向上的压力。Yao 等[13]通过实验和理论相结合的方法研究了弹丸垂直入水问题,获得了入水空泡的发展过程和弹丸的运动特性,并指出射弹在撞水之后的阶段需要考虑重力效应。Jiang 等[14]通过实验和数值模拟的方法研究了射弹垂直进入减阻液中诱导的超空泡流动特性。马庆鹏等[15]采用 VOF 多相流模型建立了锥头圆柱体高速入水的二维数值模型,获得了运动体的入水速度变化及入水空泡的生成与发展过程。张伟等[16]利用轻气炮进行了平头和球形两种弹体水平入水实验,获得了弹体入水产生的冲击波和传播特性。时素果等[17]在水池中进行了细长体高速入水实验,获得了入水空泡的形态和细长体的表面压力变化规律。郭子涛等[18]利用一级轻气炮设备开展了多种头型的弹体水平入水实验,入水速度范围为 100 ~ 300 m/s,获得了入水空泡的演化过程和空泡壁的扩展速度特性。Chen 等[19]实验研究了射弹高速入水过程的弹道稳定性,分析了弹头形状、撞击速度、入水姿态角对射弹弹道稳定性的影响,结果显示平头射弹的弹道稳定性最好。王晓辉等[20]基于耦合欧拉-拉格朗日方法开展了射弹高速入水过程的数值模拟,分析了射弹入水尾拍这一动态运动的形成机理。

关于串联运动体入水的研究目前尚不多见。何春涛等[21]对在重力加速下两个弹体串联倾斜低速入水问题进行了探索试验,结果显示两弹体间隔距离较小的情况下发生了追尾碰撞,碰撞导致两弹体偏离了预期运行轨迹。余德磊等[22]利用高速摄像技术进行了串联回转体低速垂直入水实验,得到了深闭合空泡扰动下串联入水的运动模式。Yun 等[1]采用高速摄像技术开展了串联双球体低速倾斜入水实验,获得了入水空泡的演化特性、球体的运动特性及受力变化。施红辉等[23]开展了两连发超空泡射弹垂直入水的二维数值模拟,发现了第二发射弹的流场会受到第一发射弹入水流场的干扰。

综上所述,国内外对单独物体入水研究较为成熟,但关于串联物体高速入水问题的研究仍处于起步阶段。串联物体高速入水的流场非常复杂,涉及了跨介质、湍动、空化、流场的相互作用,其入水空泡的演化机理、流体动力学特性等尚不明确,还需要进一步的深入研究。本研究基于求解 N-S 方程,采用 VOF 多相流模型和 6DOF 刚体运动模型,引入 Schnerr-Sauer 空化模型,结合重叠网格技术实现流场和弹道的耦合求解,建立串联回转体垂直高速入水的数值模型,获得不同入水时序下串联回转体入水空泡的演化规律和运动特性,分析新的流动现象形成的机理。

1 控制方程与数值计算方法

1.1 控制方程

本研究基于均质混合流假设处理入水过程的多相流场,即空气、水、水蒸气三相的混合流体被当作密度和黏度随时间和空间变化的一种均质流体。采用流体体积函数(VOF)多相流模型来捕获不同流体相之间的界面。连续性方程和动量方程分别为

$$\frac{\partial \rho_m}{\partial t}+\frac{\partial(\rho_m u_i)}{\partial x_i}=0 \tag{1}$$

其中:ρ_m 为混合相密度,$\rho_m=\alpha_v\rho_v+\alpha_g\rho_g+\alpha_l\rho_l$;$\alpha_v$、$\alpha_g$、$\alpha_l$ 分别为水蒸气、空气、水的体积分数,$\alpha_v+\alpha_g+\alpha_l=1$,$\rho_v$、$\rho_g$、$\rho_l$ 分别为水蒸气、空气、水的密度;t 为时间;u_i 为 i 轴方向的速度。

$$\frac{\partial(\rho_m u_j)}{\partial t}+\frac{\partial(\rho_m u_i u_j)}{\partial x_i}=-\frac{\partial P}{\partial x_j}+\frac{\partial}{\partial x_i}\left[\mu_m\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j}+\frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right)\right]+\rho_m g_i \tag{2}$$

其中:P 为压力;μ_m 为混合相动力黏度,$\mu_m=\alpha_v\mu_v+\alpha_g\mu_g+\alpha_l\mu_l$,$\mu_v$、$\mu_g$、$\mu_l$ 分别为水蒸气、空气、水的动力黏度;μ_j 为 j 轴方向的速度;g_i 为重力加速度的分量。

采用 SST κ-ω 湍流模型[24]对 RANS 方程提供湍流封闭,该模型考虑了湍流剪切应力传输。运动体高速入水过程中会产生空化现象,对于空化的求解采用 Schnerr-Sauer 空化模型[25],该空化模型具有较高收敛速度和计算稳定性。其控制方程如下。

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_v\rho_v)+\nabla\cdot(\alpha_v\rho_v \boldsymbol{v}_v)=R_e-R_c \tag{3}$$

$$R_e=\frac{\rho_v\rho_l}{\rho_m}\alpha_v(1-\alpha_v)\frac{3}{R_B}\sqrt{\frac{2}{3}\left(\frac{P_v-P}{\rho_l}\right)},P_v>P \tag{4}$$

$$R_c=\frac{\rho_v\rho_l}{\rho_m}\alpha_v(1-\alpha_v)\frac{3}{R_B}\sqrt{\frac{2}{3}\left(\frac{P-P_v}{\rho_l}\right)},P_v<P \tag{5}$$

其中:$\boldsymbol{v}_v$为水蒸汽相的速度矢量;R_e、R_c 分别为蒸发速率和冷凝速率;R_B 为气核的半径,$R_B=\left(\frac{\alpha_v}{1-\alpha_v}\cdot\frac{3}{4/\pi}\cdot\frac{1}{n}\right)\frac{1}{3}$,$n=1\times10^{11}$;$P_v$ 为水的饱和蒸汽压力。

物体的运动通过 6DOF 刚体运动模型来求解。物体运动可分为质心的平动和绕质心的转动,在每个时间步,利用作用在物体的力和力矩计算出平移加速度和角加速度,然后通过积分得到物体的平移速度和角速度,进一步计算得到物体新的质心位置和欧拉角[26]。设 $\boldsymbol{x}_{cg}^n$ 和$\boldsymbol{\theta}_{cg}^n$ 分别表示第 n 时间步质心的位置和物体的运动方向,那么第 $n+1$ 时间步质心的位置和物体的运动方向为[27]

$$\begin{cases}\boldsymbol{x}_{cg}^{n+1}=\boldsymbol{x}_{cg}^n+\boldsymbol{v}_{cg}\Delta t\\ \boldsymbol{\theta}_{cg}^{n+1}=\boldsymbol{\theta}_{cg}^n+\boldsymbol{G}\boldsymbol{w}_{cg}\Delta t\end{cases} \tag{6}$$

其中:Δt 为时间步长;$\boldsymbol{w}_{cg}$ 和 $\boldsymbol{v}_{cg}$分别为物体的角速度和平移速度;$\boldsymbol{G}$ 为变换矩阵。

1.2 数值模型及边界条件

回转体模型采用参考文献[19]中的平头弹体,如图 1 所示。弹体的直径 $D=6$ mm,长度 $L=24$ mm,材质为 45# 钢,质量为 4.88 g。

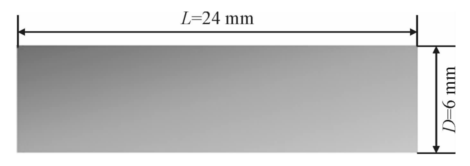


图 1 回转体结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the revolved body model

计算域及边界条件设置如图 2 所示。计算域尺度为 50D×50D×250D，流场空气域高度为 25D，水域深度为 225D，首发回转体与次发回转体首尾相距 12D，计算域上方为压力入口，压强与标准大气压一致，计算域侧面和底部为压力出口，它们的压力值通过自定义函数进行指定，首发回转体和次发回转体的表面均设定为无滑移壁面。

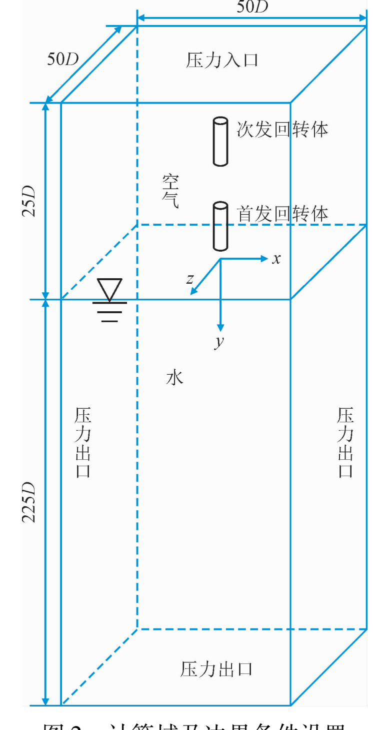


图 2　计算域及边界条件设置

Fig. 2　Computational domain and boundary condition setting

1.3　网格划分及数值方法

流场计算采用重叠（overset）网格技术，图 3 给出了计算域的网格划分示意图。该计算域网格划分分为背景网格（background mesh）和前景网格（component mesh），由于首发回转体和次发回转体之间存在相对运动，其前景网格计算域应当相互独立，因此需要划分两套前景网格。图 3 中 3 套网格均采用六面体结构化网格，网格数量约为 214 万。背景网格区域对自由液面附近和回转体运动区域进行局部加密，提高入水空泡边界的计算精度。两套前景网格区域的大小和网格划分方式相同，均为包裹回转体的圆柱，其长度为 10D，直径为 5D，前景网格区域内部的回转体壁面附件的网格进行局部加密。计算中，设置前景网格 1 计算域与首发回转体同步运动以及前景网格 2 计算域与次发回转体同步运动，然后结合 6DOF 算法可以实现两个回转体各自独立运动的六自由度运动求解。

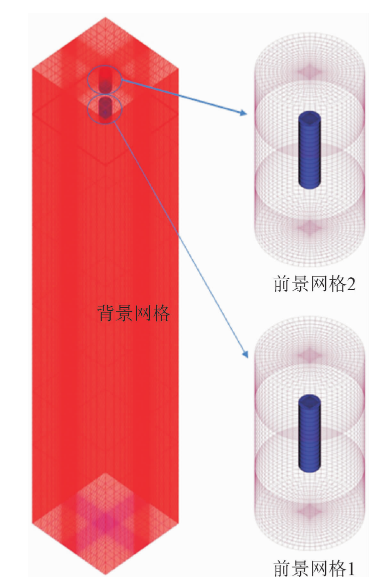


图 3　网格划分示意图

Fig. 3　Schematic diagram of computational domain grids

数值模拟基于 Flunet 19.0 平台开展，其中瞬时压力场与速度场的耦合求解采用 Coupled 算法，压力插值采用 PRESTO! 格式，各项体积率离散采用 Modified HRIC 格式，湍流和耗散相离散均采用二阶迎风格式。

为排除网格密度对数值模拟结果的影响，需要开展网格无关性验证。在自由液面附近、回转体壁面和运动区域进行了局部加密，建立了 3 种不同密度的网格，网格数量分别约为 102 万（case1）、214 万（case2）、307 万（case3）。对入水时序为 1 ms，入水速度为 106.8 m/s 的串联回转体入水进行了数值模拟，得到了首发回转体运动速度随时间的变化曲线，如图 4 所示。从图中可以看出，case1 与 case2 网格计算结果差异较大，而 case2 和 case3 网格的计算结果基本一致。综合考虑计算效率和计算精度，计算时选择了 case2 的网格开展数值计算。

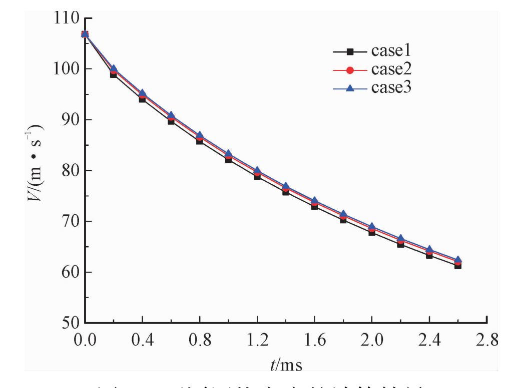
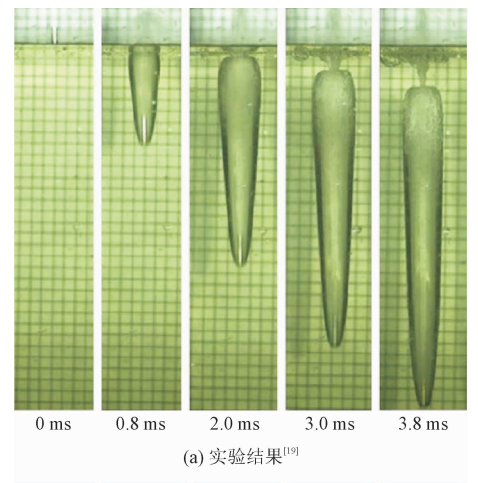


图 4　不同网格密度的计算结果

Fig. 4　Calculated results of different mesh densities

1.4 数值方法验证

关于串联物体高速入水目前还未见到相关的实验数据，因此采用上文的数值模拟方法对文献[19]中实验开展的单发平头弹体垂直入水问题进行数值模拟。本研究选择的回转体模型(见图1)就是该实验中所用的平头弹体模型，实验中平头弹体的入水初速度为106.8 m/s。数值模拟计算过程中，设置次发回转体静止不动，首发回转体以106.8 m/s的速度入水，这样就可以实现单独的物体入水问题求解。图5给出了回转体入水空泡演化的实验和数值模拟结果。通过对比可以看出两者对应良好，单独回转体入水经历了入水撞击、开空泡、空泡表面闭合、空泡随动及尾部溃灭等阶段。在实验和数值模拟中均表明该回转体入水的弹道稳定性很好，几乎没有发生弹道的偏移和弹体姿态角的变化。图6给出了回转体入水深度随时间的变化，将数值模拟结果和实验结果进行对比，发现两者具有较好的一致性。通过上述对比，说明该数值模拟方法是有效的。



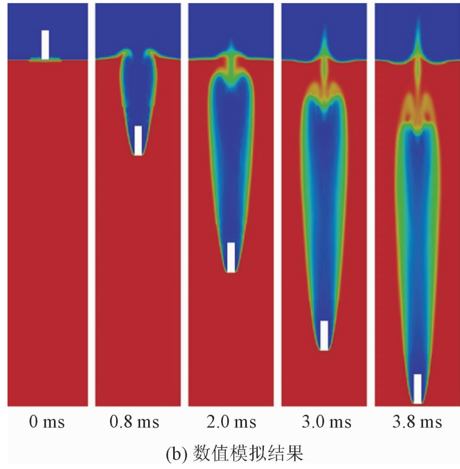


图5 回转体入水空泡演化的实验和数值模拟结果对比

Fig. 5 Comparisons of evolution of water-entry cavities between numerical simulations and experiments

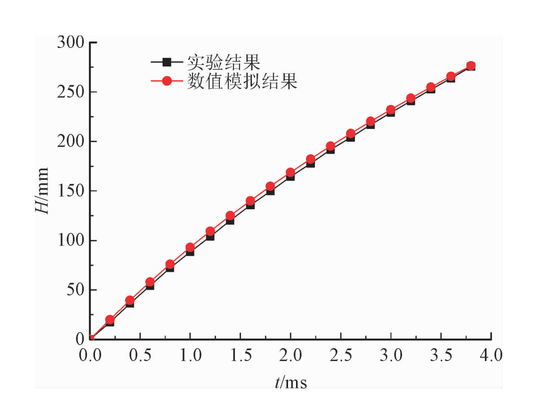


图6 单独回转体入水深度随时间的变化

Fig. 6 Variation of water entry depth of single revolution body with time

2 结果与讨论

将首发回转体头部刚接触静止自由液面的时刻设定为时间 t 的零点。首发回转体的入水初速度为 V_{10}，次发回转体的入水初速度为 V_{20}，首发和次发回转体先后接触自由液面的时间差定义为入水时序 Δt。数值模拟中可以通过UDF控制次发回转体在空气中运动的起始时间从而实现两发回转体以不同的入水时序入水，入水过程中，$V_{10} = V_{20} = 106.8$ m/s。

2.1 典型工况中串联回转体入水空泡形态演化特性

图7给出了 $\Delta t = 1$ ms 时，串联回转体入水空泡形成与演化过程。在首发回转体开空泡阶段，次发回转体紧随而来，之后次发回转体进入到先发射弹的入水空泡内部，在表面张力和水域压力的作用下，入水空泡在2 ms时刻发生表面闭合。由于空泡内部主要为空化生成的蒸气相和外界进入的空气相，其密度远小于水的密度，那么次发回转体受到的阻力也远小于首发回转体的阻力。随着时间的增加，两发回转体之间的距离越来越小，在2.85 ms时，次发回转体追上首发回转体将会发生碰撞，这里需要说明的是本研究没有研究两发回转体碰撞后的运动情形，碰撞涉及较复杂的力学机制，还需要进一步的深入研究。

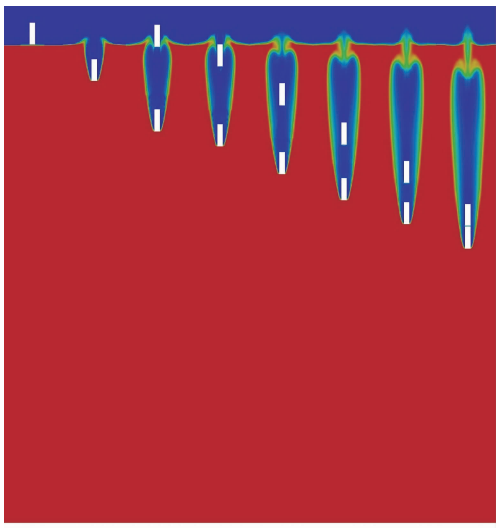


图 7　Δt = 1 ms 时,串联回转体入水空泡形成与演化过程

Fig. 7　When Δt = 1 ms, the formation and evolution of water-entry cavities of tandem revolved bodies

图 8 给出了 Δt = 3 ms 时,串联回转体入水空泡形成与演化过程。首发回转体的入水空泡在发生表面闭合和被拉离自由面时,次发回转体才刚接触自由面(图中 t = 3 ms 时),之后次发回转体经历了入水撞击、开空泡。随着次发回转体进一步向下运动,次发回转体逐渐进入到首发回转体的入水空泡内部,并引起两个入水空泡的融合,融合后的空泡在水域压力和表面张力的作用下在自由面附近发生了表面闭合。随着时间的推移,次发回转体所在位置周围的空泡发生崩溃,导致次发回转体跟随空泡的尾部运动,如图中 t = 5.4 ms 所示。由于次发回转体的速度高于首发回转体,次发回转体在 t = 7 ms 时再次

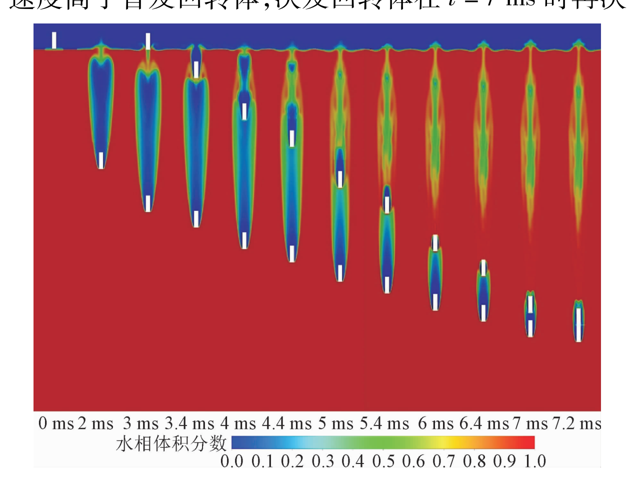


图 8　Δt = 3 ms 时,串联回转体入水空泡形成与演化过程

Fig. 8　When Δt = 3 ms, the formation and evolution of water-entry cavities of tandem revolved bodies

完全进入到首发回转体的空泡内部。在 t = 7.2 ms 时,次发回转体与首发回转体发生追尾。

图 9 给出了 Δt = 5 ms 时,串联回转体入水空泡形成与演化过程。首发回转体入水过程先后经历了入水撞击、开空泡、表面闭合、空泡随动及溃灭,其空泡演化不再受到次发回转体入水的影响,与单发回转体入水相同。而次发回转体入水过程中受到了首发回转体空泡尾迹的干扰,其入水空泡形态与单发回转体入水空泡存在明显区别,而且较早发生颈缩和溃灭现象。

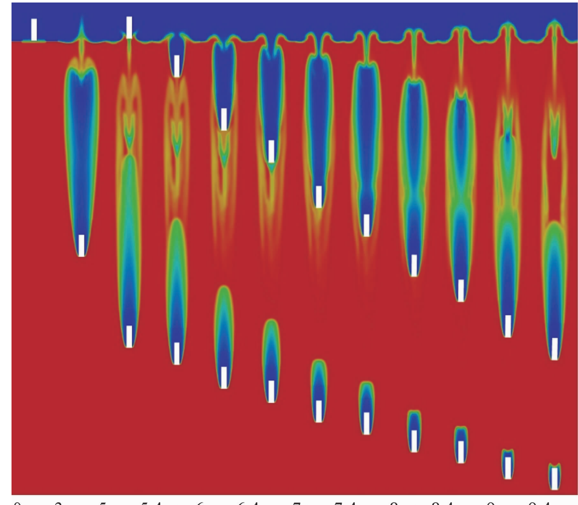


图 9　Δt = 5 ms 时,串联回转体入水空泡形成与演化过程

Fig. 9　When Δt = 5 ms, the formation and evolution of water-entry cavities of tandem revolved bodies

图 10 表示的是次发回转体入水深度 $H = 7D$ 时,不同入水时序下回转体的压力云图。3 种时序下,首发回转体均在其头部前端产生高压区,其压力场呈球面形式向周向传播,低压区出现在入水空泡内部,由于空化效应其压力值等于水的饱和蒸汽压(约为 3 540 Pa)。入水时序为 1 ms 时,次发回转体被首发回转体的低压空泡包围,其头部前端无高压区产生,因此没有形成入水空泡。入水时序为 3 ms 时,次发回转体头部前端产生了高压区,最大压力值约为 15.6 个标准大气压,并形成了低压入水空泡,但受到首发回转体空泡尾部的影响,次发回转体头部前方高压区的范围受到了压缩,不再呈球面形式向周向传播。入水时序为 5 ms 时,首发回转体的尾部空泡发生溃灭并产生局部高压,在该入水深度次发回转体受到首发回转体流场的干扰较弱,次发回转体正常形成了入水空泡并在其头部前端产生了呈球面形式传播的高压区,其最大压力约为 33.8 个标

准大气压。

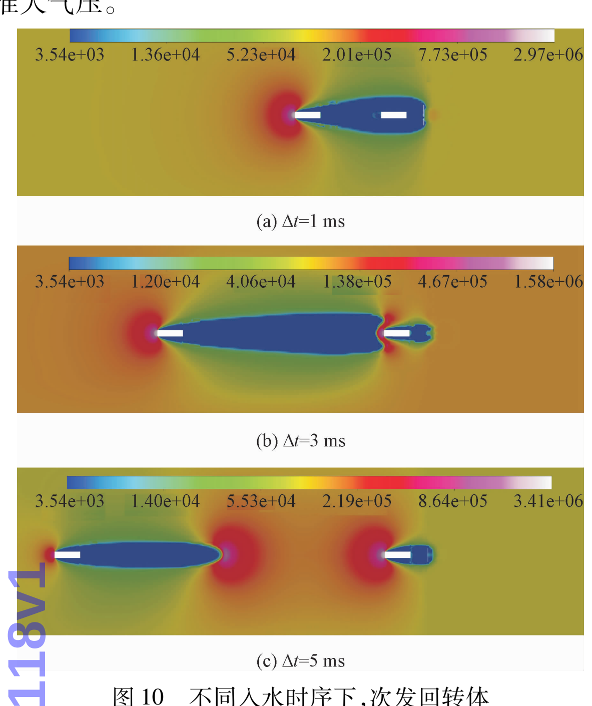


图 10　不同入水时序下，次发回转体入水深度 $H=7D$ 时的压力云图

Fig. 10　Contours of pressure when the water entry depth of the secondary revolved body $H=7D$ under different water entering time sequences

2.2　串联回转体入水运动特性

图 11 表示的是入水时序为 1 ms 时，串联回转体无量纲入水深度、速度、加速度随时间的变化曲线，自由液面为 $H=0$ 的位置。图中 H、V、a 参数的方向为竖直方向。从图 11(a)中可以看出，随着次发回转体的入水，两发回转体之间的距离越来越小，在 2.85 ms 时，次发回转体追上首发回转体。从图 11(b)和(c)中可以看出，首发回转体入水起始阶段加速度较大，速度衰减很快，这是由于物体撞击自由液面时，由于介质突变产生巨大的反向冲击作用，使得回转体产生巨大的反向加速度，速度衰减很大。之后随着撞击点距离的增加和入水空泡的形成，首发回转体加速度值迅速降低。对于次发回转体，由于次发回转体入水过程中直接进入了首发回转体的入水空泡内，导致次发回转体受到量级很小的空气阻力值，引起次发回转体的加速度和速度变化很小。

图 12 表示的是入水时序为 3 ms 时，串联回转体无量纲入水深度、速度、加速度随时间的变化曲线。从图中可知，次发回转体在 3 ms 时刻入水，入水后次发回转体与首发回转体之间的距离在逐渐缩短，在 7.2 ms 时两发回转体发生追尾。整体上，首发回转体速度衰减程度大于次发回转体的速度衰减。在入水撞击的瞬时，次发回转体受到的加速度大小明显小于首发回转体，主要是由于次发回转体撞水时，水层下方存在首发回转体的低压空泡流场，减弱了次发回转体撞水的反向冲击作用。随着时间的增加，次发回转体进入了首发回转体的空泡内部运动，其受到的阻力急剧减小，所以加速度值急剧变小和速度衰减变缓。随后次发回转体的加速度曲线出现增大、减小、再增大和减小的趋势，这是由于随

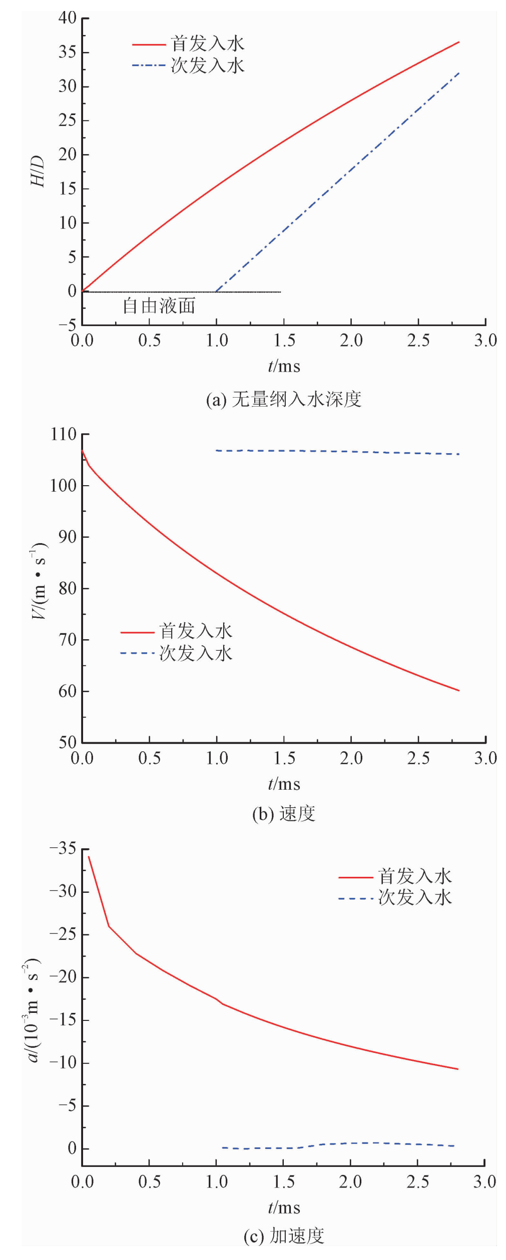


图 11　$\Delta t=1$ ms 时，回转体无量纲入水深度、速度、加速度随时间的变化

Fig. 11　When $\Delta t=1$ ms, variation of dimensionless penetration depth, velocity and acceleration of revolved bodies with time

着首发回转体空化数的持续增大及次发回转体在首发空泡内运动的干扰，引起首发空泡内部蒸汽相液化、溃灭，导致次发回转体的受力十分复杂。

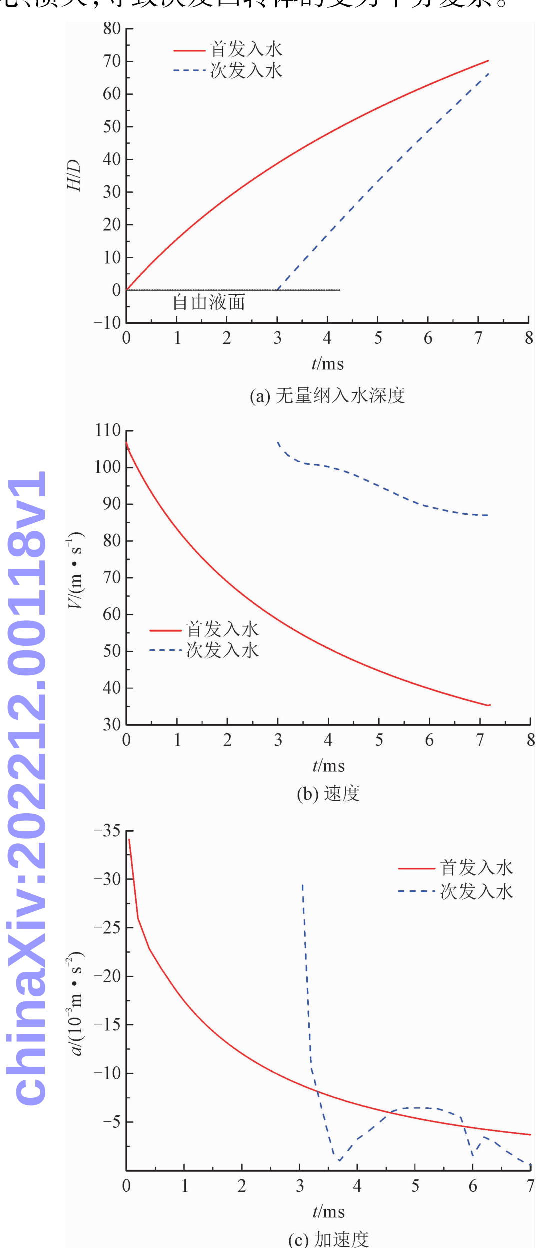


图 12　$\Delta t=3$ ms 时，回转体无量纲入水深度、速度、加速度随时间的变化

Fig. 12　When $\Delta t=3$ ms, variation of dimensionless penetration depth, velocity and acceleration of revolved bodies with time

图 13 表示的是入水时序为 5 ms 时，串联回转体无量纲入水深度、速度、加速度随时间的变化曲线。在 $t=9$ ms 时刻，首发回转体的运动速度已经衰减到初速度的 27.6%，此时次发回转体和首发回转体还没有发生追尾。在入水撞击瞬间，次发回转体的加速度是小于首发回转体的，与入水时序为 3 ms 时的工况一样。在入水阶段，受首发回转体运动过后留下的脱落空泡影响，次发回转体的速度衰减程度是小于首发回转体的。

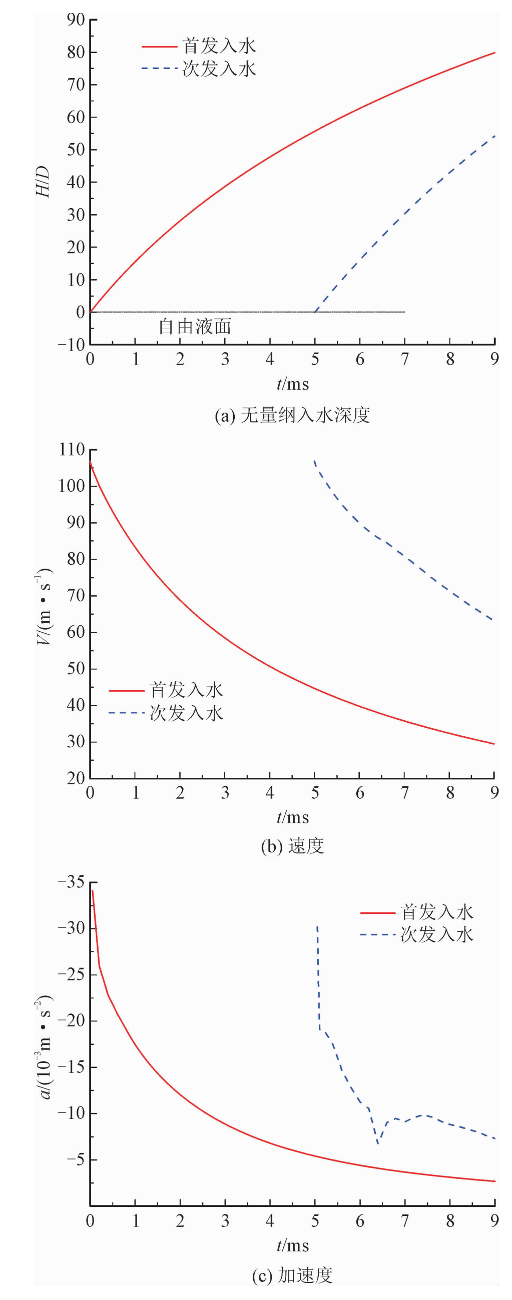


图 13　$\Delta t=5$ ms 时，回转体无量纲入水深度、速度、加速度随时间的变化

Fig. 13　When $\Delta t=5$ ms, variation of dimensionless penetration depth, velocity and acceleration of revolved bodies with time

通过上述的分析，可以发现不同的入水时序下串联回转体将出现不同特征的扰动，该扰动对回转体入水空泡的发展和运动特性产生重要的影响。随着入水时序的增加，依次出现两种运动模式，分别为追尾模式和弱扰动模式。追尾模式为次发回转体受

到首发回转体空泡流场的影响,次发回转体能够进入到首发回转体的空泡内部运动,最终次发回转体将追上首发回转体。弱扰动模式为首发回转体的入水空泡演化未受影响,而次发回转体的空泡演化和运动受到首发回转体空泡尾迹的干扰。

3 结论

本研究建立了模拟串联回转体入水过程的三维数值模型,开展了不同入水时序下串联回转体以106.8 m/s 的初速度入水问题研究,获得了典型工况下串联回转体的入水空泡演化特性以及串联回转体无量纲入水深度、速度、加速度随时间的变化。主要获得如下结论。

1)次发回转体入水过程受到首发回转体入水空泡流场的影响,在入水撞击阶段,次发回转体受到的冲击力小于首发回转体。而且在入水过程中次发回转体的速度衰减小于首发回转体。

2)随着入水时序增大,串联回转体入水运动模式依次出现追尾模式和弱扰动模式。在追尾模式中,次发回转体能够进入首发回转体形成的入水空泡内部运动,当入水时序较小时,次发回转体不产生入水空泡;当入水时序较大时,首发和次发回转体各自产生的空泡会融合成一个空泡。在弱扰动模式中,首发回转体的空泡演化过不受次发回转体入水的影响,而次发回转体的空泡演化和运动受到了首发回转体空泡尾迹的干扰。

参考文献:

[1] YUN H L, LYU X J, WEI Z Y. Experimental study on oblique water entry of two tandem spheres with collision effect[J]. Journal of visualization, 2020, 23(1): 49-59.

[2] TRUSCOTT T T, EPPS B P, BELDEN J. Water entry of projectiles[J]. Annual review of fluid mechanics, 2013, 46: 355-378.

[3] WORTHINGTON A M, COLE R S V. Impact with a liquid surface, studied by the aid of instantaneous photography[J]. Philosophical transactions of the royal society A, 1897, 194: 137-148.

[4] MAY A. Effect of surface condition of a sphere on its water-entry cavity[J]. Journal of applied physics, 1951, 22(10): 1219-1222.

[5] MAY A. Vertical entry of missiles into water[J]. Journal of applied physics, 1952, 23(12): 1362-1372.

[6] ABELSON H I. Pressure measurements in the water-entry cavity[J]. Journal of fluid mechanics, 1970, 44(1): 129-144.

[7] LEE M, LONGORIA R G, WILSON D E, et al. Cavity dynamics in high-speed water entry[J]. Physics of fluids, 1997, 9(3): 540-550.

[8] SHI H H, TAKUYA T. Some progress in the study of the water entry phenomenon[J]. Experiments in fluids, 2001, 30(4): 475-477.

[9] TRUSCOTT T T, BEAL D N, TECHET A H. Shallow angle water entry of ballistic projectiles[C]//Proceedings of the 7th International Symposium on Cavitation (CAV2009). Michigan, USA: ASME, 2009: 17-22.

[10] IRANMANESH A, PASSANDIDEH-FARD M. A three-dimensional numerical approach on water entry of a horizontal circular cylinder using the volume of fluid technique[J]. Ocean engineering, 2017, 130: 557-566.

[11] NGUYEN V T, VU D T, PARK W G, et al. Navier-Stokes solver for water entry bodies with moving chimera grid method in 6DOF motions[J]. Computers & fluids, 2016, 140: 19-38.

[12] TREICHLER D M, KIGER K T. Shallow water entry of supercavitating darts[J]. Experiments in fluids, 2020, 61(2): 1-17.

[13] YAO E R, WANG H R, PAN L, et al. Vertical water-entry of bullet-shaped projectiles[J]. Journal of applied mathematics and physics, 2014, 2(6): 323-334.

[14] JIANG C X, LI F C. Experimental and numerical study of water entry supercavity influenced by turbulent drag-reducing additives[J]. Advances inmechanical engineering, 2014, 6: 280643.

[15] 马庆鹏,魏英杰,王聪,等. 锥头圆柱体高速入水空泡数值模拟[J]. 北京航空航天大学学报, 2014, 40(2): 204-209.
MA Qingpeng, WEI Yingjie, WANG Cong, et al. Numerical simulation of high-speed water-entry cavity of cone cylinder[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2014, 40(2): 204-209(in Chinese).

[16] 张伟,黄威,任鹏,等. 高速弹体水平入水产生冲击波特性[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2016, 48(4): 37-41.
ZHANG Wei, HUANG Wei, REN Peng, et al. The underwater shock wave characteristics caused by high speed horizontal water entry projectiles[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2016, 48(4): 37-41(in Chinese).

[17] 时素果,杨晓光,王亚东,等. 细长体高速入水过程压力特性试验研究[J]. 应用力学学报, 2018, 35(2): 223-227.
SHI Suguo, YANG Xiaoguang, WANG Yadong, et al. Experimental study on the pressure characteristic of high-speed slender body water entry[J]. Chinese journal of applied mechanics, 2018, 35(2): 223-227(in Chinese).

[18] 郭子涛,陈拓,郭钊,等. 弹体水平入水的空泡扩展相关特性研究[J]. 振动与冲击, 2019, 38(4): 90-94.
GUO Zitao, CHEN Tuo, GUO Zhao, et al. A study on the cavitation expansion related characteristics induced by horizontal water entry of projectiles[J]. Journal of vibration and shock, 2019, 38(4): 90-94(in Chinese).

[19] CHEN T,HUANG W,ZHANG W,et al. Experimental investigation on trajectory stability of high-speed water entry projectiles[J]. Ocean engineering,2019,175:16-24.

[20] 王晓辉,孙士明,季锦梁,等. 基于耦合欧拉-拉格朗日方法的射弹高速入水尾拍数值分析[J]. 兵工学报,2020,41(增刊1):112-117.
WANG Xiaohui,SUN Shiming,JI Jinliang,et al. Numerical analysis of tail-slapping of projectile in process of high-speed water-entry based on coupled eulerian-lagrangian method[J]. Acta armamentarii,2020,41(S1):112-117(in Chinese).

[21] 何春涛,王聪,何乾坤,等. 圆柱体低速入水空泡试验研究[J]. 物理学报,2012,61(13):281-288.
HE Chuntao,WANG Cong,HE Qiankun,et al. Low speed water-entry of cylindrical projectile[J]. Acta physica Sinica,2012,61(13):281-288(in Chinese).

[22] 余德磊,曹伟,魏英杰. 回转体低速串联入水空泡及运动特性试验研究[J]. 兵工学报,2020,41(7):1375-1383.
YU Delei,CAO Wei,WEI Yingjie. Experimental reaserch on cavitation and motion characteristics of low-speed water entry of rotary bodies in tandem[J]. Acta armamentarii,2020,41(7):1375-1383(in Chinese).

[23] 施红辉,周东辉,周栋,等. 两连发射弹出入水的轴对称超空泡流动特性[J]. 空气动力学学报,2019,38(6):1064-1074.
SHI Honghui,ZHOU Donghui,ZHOU Dong,et al. Research on the characteristics of supercavitating flows induced by two successively fired projectiles in water entry and exit[J]. Acta aerodynamica Sinica,2019,38(6):1064-1074(in Chinese).

[24] MENTER F R,MENTER F. Two-equation eddy-viscosity transport turbulence model for engineering applications[J]. AIAA journal,1994,32(8):1598-1605.

[25] 魏海鹏,符松. 不同多相流模型在航行体出水流场数值模拟中的应用[J]. 振动与冲击,2015,34(4):48-52.
WEI Haipeng,FU Song. Multiphase models for flow field numerical simulation of a vehicle rising from water[J]. Journal of vibration and shock,2015,34(4):48-52(in Chinese).

[26] 朱珠,罗松,卢丙举,等. 旋转射弹高速倾斜入水多相流场与弹道数值模拟[J]. 爆炸与冲击,2019,39(11):69-79.
ZHU Zhu,LUO Song,LU Bingju,et al. Numerical simulation of multiphase flow field and trajectory of high-speed oblique water entry of rotating projectile[J]. Explosion and shock waves,2019,39(11):69-79(in Chinese).

[27] 张学伟,李强,黄岚. 基于6DOF超空泡射弹减阻性能分析[J]. 弹箭与制导学报,2016,36(5):109-111.
ZHANG Xuewei,LI Qiang,HUANG Lan. Analysis of drag reduction on supercavitation projectile based on 6DOF[J]. Journal of projectiles,rockets,missiles and guidance,2016,36(5):109-111(in Chinese).

（编辑　李坤璐）

